

自己組織化フォトニックナノ構造による連続発振レーザー光源の研究開発 (062103003)

Self-organized photonic nano-structures for laser applications

研究代表者

古海 誓一 独立行政法人 物質・材料研究機構 光材料センター

Seiichi Furumi Optronics Center, National Institute for Materials Science (NIMS)

研究分担者

白幡 直人

Naoto Shirahata

独立行政法人 物質・材料研究機構 ナノセラミックスセンター

Nano Ceramics Center, National Institute for Materials Science (NIMS)

研究期間 平成 18 年度～平成 20 年度

概要

本研究の目的は、有機・高分子材料のフォトニックナノ構造を自己組織的に創製し、そのフォトニックバンド効果により発現する発光性ナノクリスタルの新奇な光学増幅現象を探索することである。

蛍光性有機色素と比較して、ナノクリスタルは優れた発光安定性を備えており、その発光波長は量子サイズ効果によって変化することがある。この発光性ナノクリスタルを、有機・高分子材料が自己組織的に形成したフォトニックナノ構造の中に分子レベルで分散・凝集状態を制御し、フォトニックバンド中の「伝搬モード」とナノクリスタルのランダムネスによる「局在モード」が強調作用する最適な条件を見つけ出す。本研究により、高効率で安定性の優れた連続発振レーザー光源の構築が期待できる。

Abstract

Our research project is the development of photonic nano-structures of organic and polymer materials fabricated through the self-organization, leading to novel optical enhancement of light-emitting nanocrystals by the photonic band effect. Such light-emitting inorganic nanocrystals show stable optical properties, which are dependent on the crystal size, rather than organic dyes. We would like to try the controlled dispersion state of the nanocrystals within the self-organized photonic nanostructures of organic and polymer materials. Moreover, we aim the fabrication of efficient and stable continuous laser devices by coupling the photonic band and localized effect.

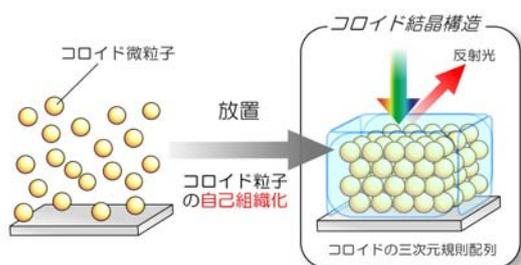
1. まえがき

情報通信の需要の増大は、「革命」と呼ばれるほどのインパクトを社会に与えている。これは、光通信の普及や携帯電話の高度化に伴っており、今後、更に加速することは明白である。次世代ユビキタス社会・ボーダレス社会において、高速・大容量フォトニックネットワークを実現するためには、高性能なフォトニックデバイスが必要不可欠である。特に、レーザーは今日の情報通信分野に限らず、記録媒体光源、医学的診断や治療システム、さらにはリアプロジェクションテレビに至る多種多様な産業分野で活躍している。

このような背景のもとで、本研究課題では、有機・高分子材料の自己組織化によって形成するフォトニックナノ

構造に発光性ナノクリスタルを分散制御することで、連続発振レーザー光源の構築を目的とした。自己組織化による有機・高分子フォトニックナノ構造は、これまでいくつか報告されているが、図1に示すように、コロイド粒子が三次元的に規則配列した「コロイド結晶構造」とキラル液晶分子が創り出す「超分子らせん構造」という二つのフォトニックナノ構造に着目した。これら自己組織化フォトニックナノ構造は、目的に応じて適宜、使い分ける。フォトニックナノ構造の働きは微小共振器であり、有機フォトニックナノ構造の中に分散する発光性ナノクリスタルの働きは、発光媒体および散乱媒体に相当する。本研究課題を遂行することで、いくつかの研究成果を得ることができた。以下に、その代表的なトピックスについて述べる。

(A) コロイド粒子のフォトニックナノ構造



(B) キラル液晶のフォトニックナノ構造

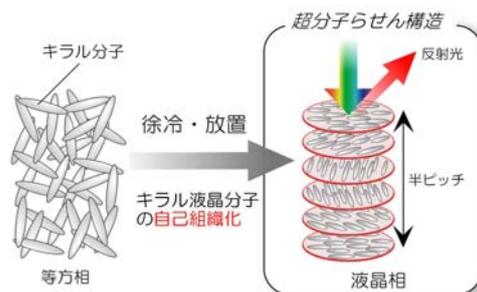


図1 有機・高分子材料による自己組織化フォトニックナノ構造。

2. 研究内容及び成果

図 1(A)のようなコロイド結晶を用いて、全てが高分子材料からなるフレキシブルなレーザーデバイスの作製に成功した。半径 100 nm の高分子微粒子の高品質コロイド結晶膜と発光性高分子を組み合わせることで、レーザーが発振する。デバイス構造は 2 枚のコロイド結晶膜の間に発光層を挟んだだけで、簡便である。本デバイスを 532 nm の光で励起すると、図 2 に示すように、コロイド結晶のフォトニックバンドギャップ、すなわち反射バンド内の 610 nm 付近でレーザー光が発現した。この時、発光のスペクトル線幅は 0.17 nm と非常に狭く、光共振器の品質の指標となる Q 値は 3.6×10^3 と算出できた。特筆すべき点として、これまでのコロイド結晶を用いたレーザー発振の報告と比較すると、レーザー発振に要する光励起ピークパワーは二桁以上も低く、世界トップの値であった。さらに、図 2 の挿入図のように、フレキシブルなレーザーデバイスの作製にも成功した。レーザーに、従来の外部共振器のあるデバイスでは成しえない柔軟性や加工性を付与させることができた。

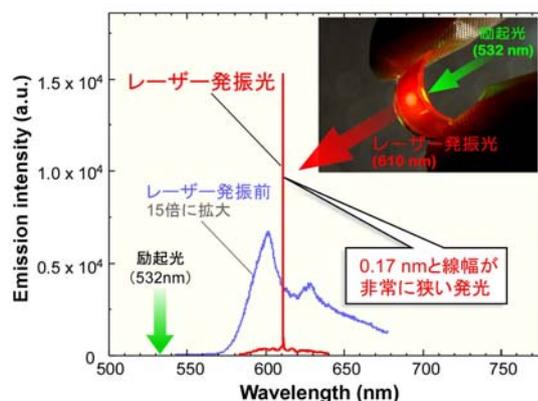


図2 コロイド結晶を用いたレーザーデバイスの発光スペクトル。青線はレーザー発振前、赤線はレーザー発振時の発光スペクトルである。挿入図は、全てが高分子材料からなるフレキシブルレーザーである。

また、図 1(B)のようなキラル液晶によるチューナブルレーザー発振にも成功した。キラル液晶の超分子らせん構造は 1 次元フォトニック結晶と見なせ、群速度異常によりフォトニックバンド端でレーザー発振することが知られている。これまでの報告例を調べてみると、液晶ディスプレイに導入されている市販の低分子、もしくは高分子の液晶材料を使ってレーザー発振を研究している。そこで、本発表者は、ガラス状態を示す新しい発光性キラル液晶材料を合成し、その発光特性の評価を行った。この材料を液晶相温度から過冷却すると、鮮やかな反射光を呈する薄膜に変化した。過冷却操作によって液晶のガラス状態を得ることができ、化学結合を介さずに容易に、かつ安定に、キラル液晶の超分子らせん構造を固定化することができた。加熱時の温度差を利用すると、数十マイクロメートルの領域にブラッグ反射が青から緑に連続的にグラデーションした薄膜を調整できた。顕微鏡を使って発光スペクトルを測定すると、グラデーション部分の位置を移動させることでレーザー発振の波長を 480 nm ~ 550 nm の範囲でチューニングできることを明示した。

その他の研究成果として、ガリウムをベースとした新規発光性無機材料の合成やシリコンナノ粒子の液相合成も行った。現在、バイオサイエンスの蛍光プローブとして、蛍光性有機色素を用いられているが、その代替材料として

量子サイズ効果を示す CdSe や ZnSe などの II-VI 族の半導体量子ドットが広く使われ始めている。しなしながら、猛毒性の Cd や Se という元素を含有しているため、安全かつ安定な発光性材料の開発が渴望されている。今回、合成した発光性無機材料は、比較的にか安全かつ低環境負荷であるため、学術的だけでなく実用的にも大きなインパクトを与えることができるであろう。

3. むすび

本研究では、有機・高分子材料を用いた自己組織化フォトニックナノ構造の作製とレーザーデバイスへの展開、そして新しい発光性無機材料の合成を行った。特に、コロイド結晶によるフレキシブルレーザーは国内外で高く評価され、有機・高分子フォトニクスデバイスへの新たな局面を示すことができたと思っている。当初の目標であるフォトニックバンド効果による伝搬モードとランダムネスによる局在モードを結合させた高効率なレーザー発振を期間中に達成することができなかったが、終了後も引き続き研究目標に向かって邁進して行く予定である。

最後に、共同研究者である物質・材料研究機構の不動寺浩主幹研究員、宮崎 英樹グループリーダー、澤田 勉グループリーダー、目 義雄センター長、北海道大学の玉置 信之教授に厚く御礼申し上げます。また、本研究課題を戦略的情報通信研究開発推進制度に採択して頂いたことについて、改めて感謝したい。

【参加国際標準会議リスト】

- [1] SPIE Meeting, Active Photonic Crystals II, San Diego, U.S.A., 2008 年 8 月 13 日
- [2] Particles 2008, Orlando, U.S.A., 2008 年 5 月 11 日
- [3] The 14th International Display Workshop 2007, Sapporo, Japan, 2007 年 12 月 6 日

【誌上发表リスト】

- [1] Seiichi Furumi, Hiroshi Fudouzi, and Tsutomu Sawada, "Self-organized colloidal crystals for photonics and laser applications (Invited Review)", *Laser & Photonics Reviews*, (now on Web. DOI:10.1002/lpor.200910005) in press (2009 年 4 月 22 日)
- [2] Seiichi Furumi, Hiroshi Fudouzi, Hideki T. Miyazaki, and Yoshio Sakka, "Flexible polymer colloidal-crystal lasers with a light-emitting planar defect", *Advanced Materials*, Vol. 19, No. 16, pp. 2067-2072 (2007 年 8 月 1 日)
- [3] Seiichi Furumi and Yoshio Sakka, "Chiroptical properties induced in chiral photonic-bandgap liquid crystals leading to a highly efficient laser-feedback effect", *Advanced Materials*, Vol. 18, No. 6, pp. 775-780 (2006 年 4 月 1 日)

【受賞リスト】

- [1] 古海 誓一、独立行政法人 物質・材料研究機構 理事長賞 研究奨励賞、「リサイクル・低環境負荷な高分子を基盤材料にした高効率レーザーの研究開発」、2008 年 4 月 1 日
- [2] 古海 誓一、財団法人 船井情報科学振興財団 船井情報科学奨励賞、「キラルフォトニックバンド液晶によるレーザー発振制御に関する研究」、2006 年 4 月 22 日

【報道発表リスト】

- [1] "Lithe Lasers (しなかやなレーザー)", *Nature Photonics*, 2007 年 9 月 1 日